

## 随动系统校正网络的设计

刘元祥<sup>1</sup>, 王志胜<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072; 2. 厦门大学 计算机与信息工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 由被控对象传递函数, 可直接进行随动系统校正网络设计。首先, 根据被控对象传递函数和灵敏度分析, 简化被控对象逆模型。然后, 由滤波器传递函数和滤波时间常数, 直接求得校正网络的传递函数。通过某飞行仿真器上的实际应用例子, 验证了该方法的可行性和实用性。

**关键词:** 校正网络; 随动系统; 传递函数; 灵敏度; 飞行仿真器

**中图分类号:** TP275 **文献标识码:** A

## Design of Corrector in Servo System

LIU Yuan-xiang<sup>1</sup>, WANG Zhi-sheng<sup>2</sup>

(1. Dept. of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. College of Computer and Information Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The corrector of servo system can be designed based on the transfer function of controlled object. Firstly, according to analyzing both the transfer function of the object and the sensitivity, the inverse model of the object is simplified. And then, according to the transfer function of filter and the filtering time constant, the transfer function of corrector can be calculated. The application of the corrector proposed in a flying simulator shows its validity.

**Key words:** Corrector; Servo system; Transfer function; Sensitivity; Flying simulator

### 1 引言

自适应逆控制是由美国斯坦福大学 B Widrow 教授于 1986 年提出<sup>[1]</sup>, 受其启发, 提出直接根据被控对象传递函数进行校正网络设计。该方法简单易行, 效果良好, 并通过某型飞行仿真器应用实例验证了该方法的可行性和实用性。

### 2 校正网络原理

设  $G(s)$  为一稳定被控对象的传递函数,  $\hat{G}(s)$  为  $G(s)$  的估计,  $U(s)$  为校正网络的传递函数。如图 1 为一逆控制系统,  $F(s)$  为滤波器的传递函数。对图 1 系统经过等效变换可得如图 2 等效系统。

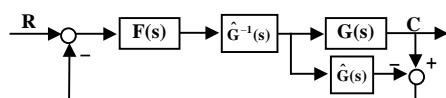


图 1 逆控制系统

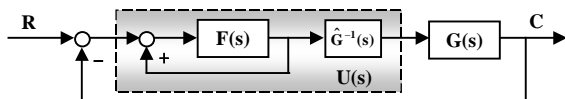


图 2 等效逆控制系统

由图 2 可得校正网络的传递函数为:

$$U(s) = \frac{F(s)\hat{G}^{-1}(s)}{1 - F(s)} \quad (1)$$

闭环控制系统的传递函数为:

$$W(s) = \frac{U(s)G(s)}{1 + U(s)G(s)} = \frac{F(s)\hat{G}^{-1}(s)G(s)}{F(s)\hat{G}^{-1}(s)G(s) - F(s) + 1} \quad (2)$$

当  $\hat{G}(s) \approx G(s)$ , 由式(2)可得  $W(s) \approx F(s)$ , 这说明闭环系统的特性比较接近滤波器的性能, 即系统特性对滤波器的特性变化非常敏感。

灵敏度是控制系统的特性对于特定元、部件特性依赖性的量度。定义系统传递函数  $W$  对于特定元部件  $K$  的微分灵敏度为<sup>[2]</sup>:

$$S_K^W = \frac{dW/W}{dK/K} = \frac{K}{W} \cdot \frac{\partial W}{\partial K} \quad (3)$$

根据系统传递函数式(2)和微分灵敏度定义式(3), 可求出控制系统特性对系统各部分特性变化的灵敏度。取参考点  $\hat{G}(s) \approx G(s)$ ,  $F(s) \approx 1$ 。

① 闭环系统特性对滤波器特性变化灵敏度:

$$S_F^W = \frac{F}{W} \cdot \frac{\partial W}{\partial F} = \frac{F}{W} \cdot \frac{\hat{G}^{-1}G}{(F\hat{G}^{-1}G - F + 1)^2} = \frac{1}{F\hat{G}^{-1}G - F + 1} \approx 1 \quad (4)$$

② 闭环系统特性对逆模型特性变化灵敏度:

$$S_{\hat{G}^{-1}}^W = \frac{\hat{G}^{-1}}{W} \cdot \frac{\partial W}{\partial \hat{G}^{-1}} = \frac{\hat{G}^{-1}}{W} \cdot \frac{F(1-F)G}{(F\hat{G}^{-1}G - F + 1)^2} = \frac{1-F}{F\hat{G}^{-1}G - F + 1} \approx 0$$

③ 闭环系统特性对被控对象特性变化灵敏度:

$$S_G^W = \frac{G}{W} \cdot \frac{\partial W}{\partial G} = \frac{G}{W} \cdot \frac{F(F-1)\hat{G}^{-1}}{(F\hat{G}^{-1}G - F + 1)^2} = \frac{F-1}{F\hat{G}^{-1}G - F + 1} \approx 0 \quad (6)$$

从上述灵敏度可知: (1) 闭环系统特性对于滤

波器特性变化比较灵敏；(2) 闭环系统特性对逆模型特性变化不灵敏；(3) 闭环系统特性对被控对象特性变化不灵敏。

### 3 校正网络设计方法

假设已得到被控对象传递函数模型为：

$$\hat{G}(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + 1} \quad n > m \quad (7)$$

为便于工程实现，被控对象逆模型可简化：

$$\hat{G}^{-1}(s) = \frac{a_k s^k + a_{k-1} s^{k-1} + \cdots + a_1 s + 1}{b_k s^k + b_{k-1} s^{k-1} + \cdots + b_1 s + b_0} \quad (8)$$

根据实际情况，可取  $k=1\sim 3$ 。滤波器  $F(s)$  为一阶滤波器，设滤波时间常数为  $T$ ，则

$$F(s) = 1/(Ts+1) \quad (9)$$

$$\hat{G}(s) = \frac{5.706e - 9s^4 + 1.848e - 6s^3 + 3.505e - 4s^2 + 0.02916s + 0.8433}{3.252e - 11s^6 + 1.543e - 8s^5 + 4.401e - 6s^4 + 6.803e - 4s^3 + 0.5501s^2 + 1.375s + 1} \quad (12)$$

根据校正网络设计方法，取  $k=1\sim 3$ ，可得一阶、二阶、三阶校正网络分别如式(13)、(14)、(15)。

$$U_I(s) = \frac{1}{Ts} \cdot \frac{1.375s + 1}{0.02916s + 0.8433} \quad (13)$$

$$U_{II}(s) = \frac{1}{Ts} \cdot \frac{0.5501s^2 + 1.375s + 1}{3.505e - 4s^2 + 0.02916s + 0.8433} \quad (14)$$

$$U_{III}(s) = \frac{1}{Ts} \cdot \frac{6.803e - 4s^3 + 0.5501s^2 + 1.375s + 1}{1.848e - 6s^3 + 3.505e - 4s^2 + 0.02916s + 0.8433} \quad (15)$$

表1 偏航轴频率特性(输入角频率 38rad/s, 幅值 0.5°)

T(s)	三阶校正网络		二阶校正网络		一阶校正网络	
	幅值比	相位差(°)	幅值比	相位差(°)	幅值比	相位差(°)
0.02	0.855	-24.7	0.791	-32.4	1.78	-84.8
0.008	0.968	-9.21	1.069	-12.1	1.578	-20.6
0.0065	0.977	-10.1	1.073	-9.8	1.417	-15.1
0.005	0.986	-8.17	1.054	-7.19		
0.0045	0.988	-7.57	不稳定区			
0.004						

当  $T < 0.0045s$  时，系统出现高频噪声，甚至不稳定；采用三阶校正网络时，当  $T = 0.008s$  时，可满足要求，当  $T < 0.004s$  时，系统出现高频噪声，甚至不稳定。因此，选用二阶校正网络可满足技术要求。

### 5 结论

根据系统实际调试过程和理论分析，可得出如下结论：

(1) 只要所建立的被控对象传递函数模型具有一定的准确度，理论上根据传递函数直接设计的校正网络都能够满足系统性能指标要求；

(2) 校正网络的阶数越高，系统性能越好；

(3) 对应不同阶数的校正网络，具有不同滤波器时间常数相对应使闭环系统性能达到最佳，且校

将式(8)和式(9)代入式(1)，可得校正网络的传递函数为

$$U(s) = \frac{1}{Ts} \cdot \frac{a_k s^k + a_{k-1} s^{k-1} + \cdots + a_1 s + 1}{b_k s^k + b_{k-1} s^{k-1} + \cdots + b_1 s + b_0} \quad (10)$$

由灵敏度分析知，闭环系统特性对滤波器特性变化比较灵敏，因此滤波时间常数  $T$  在调试中应该进行精心整定，初始值取稍大一些，如  $T = 4\omega_b^{-1}$ ， $\omega_b$  为系统所要求的带宽角频率指标。

### 4 应用例子

某型飞行仿真器是一个立式、液压三轴转台，每轴都有3种或者4种的工作方式，即位置伺服方式、速度伺服方式、速率方式和摇摆方式。以偏航轴为例，通过理论建模和实验数据相结合得到了偏航轴位置伺服系统的控制对象传递函数为：

由于要求偏航轴在频率响应 6Hz 时，幅差小于 10%，相差小于 10°，因此取滤波时间常数的初始值为  $T = 0.008s$ 。表1列出了系统在参考输入角频率  $\omega = 38rad/s$  时，基于不同滤波时间常数和不同逆模型阶数情况下的幅值误差和相位误差数据。

从表1可知：采用一阶校正网络时，调节滤波器时间常数  $T$ ，都不能满足系统性能要求，当  $T < 0.005s$  时，系统出现高频噪声且不稳定；采用二阶校正网络时，当  $T = 0.0065s$  时，可满足要求，但是，

正网络的阶数越高，滤波器时间常数可取得越小；

(4) 系统性能对滤波器时间常数比较敏感，应让  $T$  从大到小，渐近调试；

(5) 当较低阶校正网络不能满足系统性能要求时，应考虑采用较高阶的校正网络。

文中的被控对象包括已校正网络或其它网络校正器校正后的广义被控对象，因此，提出的校正网络器可在多环路系统中串联使用。

### 参考文献：

- [1] B Widrow. Adaptive Inverse Control [A]. The 2cd IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing [C]. Lund, Sweden, 1986.
- [2] 冯国楠. 现代伺服系统的分析与设计[M]. 北京：机械工业出版社，1990.